地球物理信号能量(密度) 多维分形及应用

李庆谋[1,2]　刘少华[1]

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京　100101;
2. 加拿大约克大学地球和空间科学系, 多伦多, 加拿大)

摘　要: 地球物理信号代表的地质地球物理过程在多种尺度上和尺度之间表现为自相似性(self-affinity) 或尺度无关性(Scale Invariant) , 称为地球物理信号的分形性质. 多个分形地球物理信号叠加在一起表现为多维分形特征. 研究多维分形地球物理信号的能量或能量密度特征, 可以进行时间或空间地球物理信号的校正、奇异性研究分析, 或进行不同地球物理动力学过程的分解. 本文描述了地球物理时间(空间) 信号的多维分形过程和功率谱密度(能量密度) 与波数以及重磁场能谱密度及面积(能量) 与能谱密度的多维分形关系, 并用地球物理测井与重磁资料作了试算.

关键词: 多维分形; 能量密度; 测井序列分析; 重磁场

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-2903(2001) 01-0024-07

1　引　言

时间序列的自仿射分形满足指数定律[1,2,7,8]. 即: 自相似、自仿射分形时间序列的功率谱密度与频率成指数关系, 表达为

$$S(f) \propto f^{-\beta}. \tag{1}$$

其中, $S(f)$ 为时间序列 $y(t)$ 的功率谱(能量) 密度函数, β 为分形常数, f 为频率. 有关系式

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S^2(f)\,df = V_{ar}(y(t)). \tag{2}$$

(2) 式表明, 对 $S(f)$ 在频率域的积分等于序列 $y(t)$ 的总方差. 换言之, $S(f)$ 将时间序列 $y(t)$ 的方差按照不同的尺度(波数) 分配到了频率(波数) 域, (1) 式表达的功率谱密度的分形就是原序列能量(密度) 的分形.

根据上述特征, 多个分形信号迭加的多维分形信号, 应表现为多个 β 值, 在 $S(f) \sim f$ 双对数坐标系中, 表现为不同的直线段, 代表了不同的分形地质和地球物理过程. 利用在双对数坐标中最优直线段分割方法[2], 可以帮助认识多种物理过程的迭加信号, 用滤波方法可以

收稿日期: 2000-06-20; 修订日期: 2000-10-20.

基金来源: 国家自然科学基金项目(49774237) .

作者简介: 李庆谋, 男, 1965 年生, 山东邹县人. 1994 年于中国矿业大学研究生毕业, 获博士学位, 中国科学院地球物理研究所副研究员, 现为加拿大约克大学访问学者, 主要从事地球物理测井、数学地质及 GIS 等方面的研究工作.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

得到这些物理过程的信号[2] 在滑动时窗内处理这种信号, 可以对测井等地球物理信号进行校正[1], 这种校正能够克服邻层环境影响, 尤其是校正的结果反映了邻层的迭加模式. 可以用于测井层序地层学、古环境变化研究.

对于二维地球物理场(如重磁信号) , 在空间域内的分形分析可以用于区分异常或对原地球物理场进行多类划分[3,5,6]; 在滑动的矩形窗口内进行局部奇异性、局部结构分析与校正, 研究局部场特征. 同时, 可以提高插值效果, 对原始地球物理场进行分类[4].

对二维场 $S(x, y)$ 进行 Fourier 变换, 得到二维功率谱密度场 $S(k_x, k_y)$, 功率谱密度值与大于这一功率谱密度的面积值呈指数关系[3,6]. 即

$$A(S(k_x, k_y) > C) \propto C^{-\beta}. \tag{3}$$

式中 $S(k_x, k_y)$ 是 $S(x, y)$ 的二维功率谱密度, $A(S(k_x, k_y) > C)$ 是功率谱密度大于数 C 的面积(波数域) . 公式(3) 在双对数坐标中为一直线(一维分形) 或多段直线组成的曲线段(多维分形) . 用最优分割方法划分出这些直线段. 这些划分得到的能量场代表了具有单一分形起源的地球物理场, 这些地球物理场与大地构造分区和矿产分布相对应.

2　地球物理测井信号能谱密度多维分形

地球物理测井信号反映了地层的岩石物性变化. 在沉积岩地层中, 根据层序地层学原理, 由构造沉降、水平面变化、沉积物供应和气候变化分别或相互结合控制了地层的发育. 这决定了沉积地层地球物理测井曲线在不同的尺度上与尺度之间的自相似性, 也即其分形特性或多维分形特性.

在计算测井曲线功率谱密度分形或多维分形特征之前, 对测井曲线要作预处理, 预处理的内容主要是用多项式拟合方法清除测井信号中的趋势项. 在用 Fourior 变换求出功率谱密度之后, 还要对功率谱密度曲线作滑动平均处理, 以保证随机波动影响功率谱密度 $S(f) \sim f$ 在双对数坐标中呈一段或多段直线的特征.

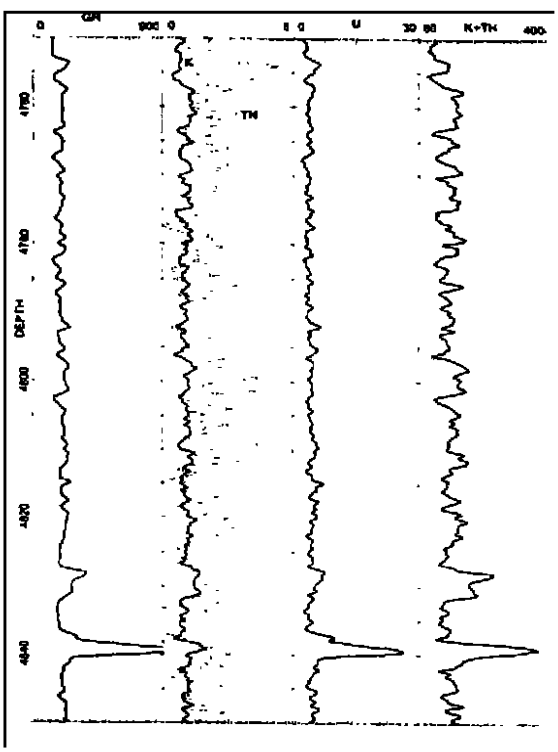

图 1　新疆 X32 井 4750~ 4850 m 自然伽玛能谱测井曲线

本文利用新疆塔里木盆地的石油钻井地球物理资料进行计算. X32 号井具有自然伽玛能谱测井曲线, 原始测井曲线如图 1 所示. 测井曲线分析了测井曲线的多维

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

分形特征. 首先对测井曲线作了二次多项式($y = a + bh + ch^2$) 趋势消除, 然后对其功率谱密度作了 7 点滑动平均. 各段的多维分形划分如图 2 所示.

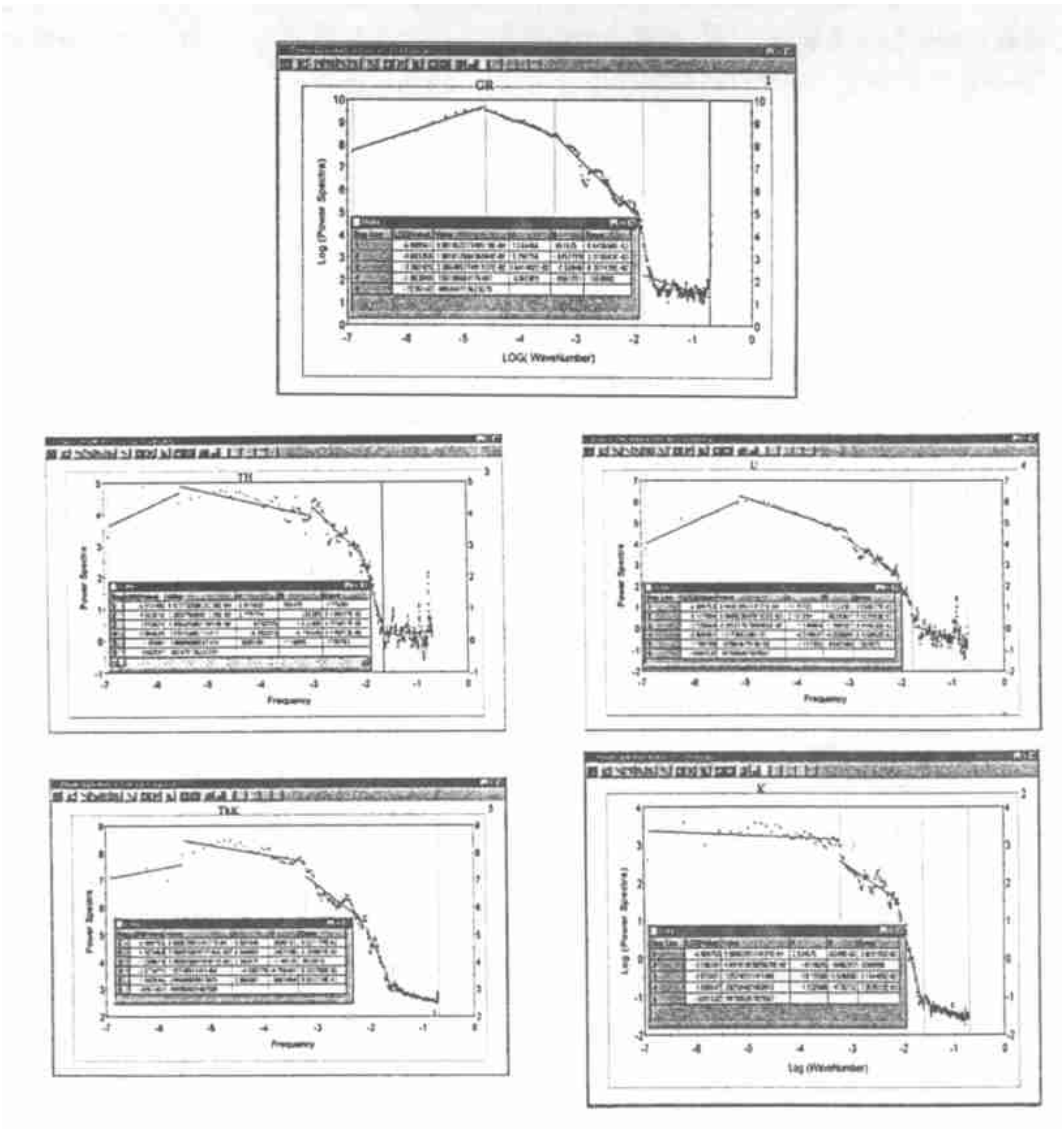

图 2 新疆 X32 井 4750~ 4850 m 自然伽玛能谱测井曲线多维分形划分

图 1 中 4840m 是一次全区性的最大水泛面, 沉积了塔北地区三叠纪最好的生油层, 表现为极高的 GR, U 和较高的 K, Th. 尤其极高的 U 曲线值, 是该生油密集段高含量有机质吸附 U 氧化物造成的直接结果. 在这层油层之上仍有几个 U, GR 的峰值, 表现为次一级的生油层. 但是 U 值含量的降低说明其生油能力渐弱, 向上表现为一个总体水平面下降, 沉积物供应增多的退积沉积过程.

从图 2(1~ 4) 中可以看出, 功率谱密度大多数可以用 4~ 5 段直线拟合, 图 2(1) , 2(3) , 2(4) 的第一段直线斜率 β 为正, 式(1) 中的 β 为负, 表现为非能量有限过程的特征, 而实际地

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

球物理信号并不可能出现这种特征. 因此, 可能是趋势消除对 $S(f) \sim f$ 低频部分有过大影响, 造成低频端能量减弱所至, 图 2(2) 比较正常, 受低频端的影响较小.

图 2(1~ 4) 有一个共同特征就是在低频端有一段变化较为平缓, 之后能谱密度随频率增加迅速下降, 到一定频率后变化又较为平缓.

综合该区的其它资料, 结合层序地层学进行分析. 我们认为在低频端的平稳段应是以水平面升降为主的沉积发育过程, 而右端(高频端) 近于平稳的过程, 应是气候和其它随机因素造成的结果, 而快速变化段则是两者影响因素的过渡.

在图 2(1) , 2(3) , 2(4) 中高频端有一特殊的峰值, 对应 4840m 处密度段(生油层) 极高的 GR, U, 而 K 曲线无此峰值, 在图 2(2) 中的高频端也无高频极值. 图 2 中拟合表给出了直线段拟合的结果, 极小的拟合方差, 说明了划分的合理性.

3　重磁场多维分形

根据(3) 式 $A \sim S(k_x, k_y)$ 在双对数坐标中应呈现直线(分形) 或多段直线(多维分形) . 利用东北及华北地台北缘和东北地区西部的布格重力异常与磁场资料对(3) 式作了试算, 结果如图 3 所示.

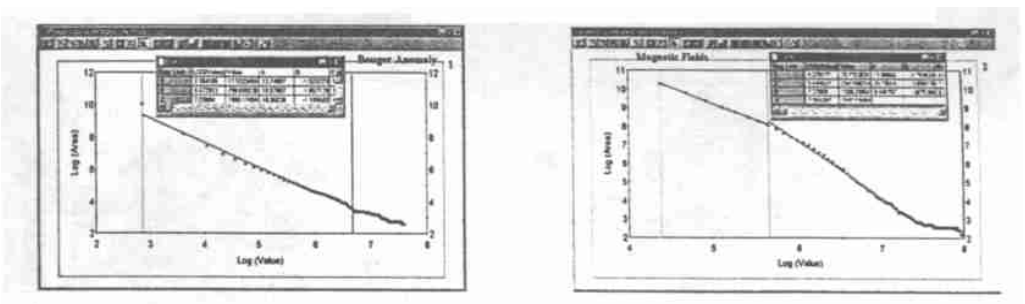

图 3　重磁场多维分形划分

图 4(1) 是原始布格重力图, 图 4(2) 是功率谱密度 $S(k_x, k_y) > 790.9$ mGal 的布格重力异常图. 从图中可以清楚地看到北东向的构造带 A 将兴蒙构造带区分开来, 在兴蒙褶皱带内的 A1 A2 构造单元也非常清晰. B 重力高代表了松辽盆地的沉积基底, 具典型北北东向构造特征, 在其上部两端有两个类似的重力高代表了基本类似的沉积盆地的基底. B1、B2 的广阔开口说明了松辽盆地中生代前北东开阔, 南西狭窄的构造发育格局. 另一构造高 C1 也清楚地表现了长白构造带的特征.

图 4(3) 是功率谱密度 $S(k_x, k_y) < 790.9$ mGal 的布格重力异常, 它较底的能谱密度对应局部构造与岩性变化, 在各个构造单元内体现了多级构造特征, 这些特征可能与金属矿床分布有密切的联系.

图 4(3~ 7) 是磁场强度的多维分形分析结果. 图 4(7) 中功率谱密度> 1598 nT 的磁场强度图中表现了与布格重力图不同的构造特征, 磁场强度的基底以南北向构造发育为主要特征, 反映了磁性地层发育的特殊性. 图 4(4~ 6) , 图 4(8) 是在各个分形段(图 3(2)) 划分出的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

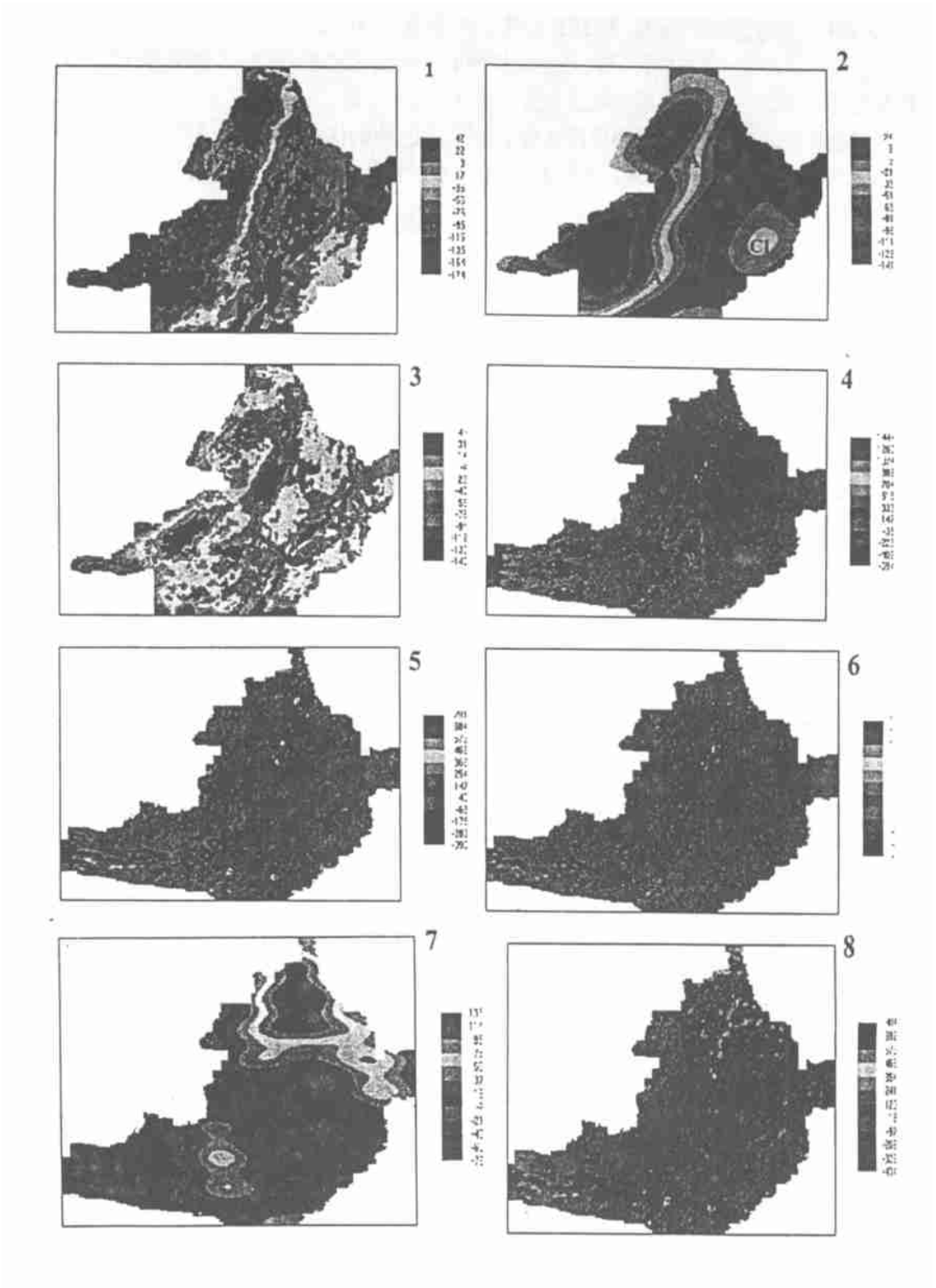

图 4　布格重力异常和磁场强度的多维分形分析结果

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

磁场强度, 它们反映了局部线性构造, 磁性地层(火成岩或变质岩) 的发育, 在右下部表现了清楚的东西构造与岩性地层发育方向, 并与已知的成矿带对应.

功率谱密度多维分形方法不同于传统地球物理场的低通、高通、带通滤波或向上/向下延拓方法. 它建立在分形地球物理信号迭加的基础之上, 有明确的物理意义. 结合正反演方法, 是了解地球物理场源的良好工具.

4　程序开发

针对时间序列或地球物理测井信号, 开发了 WIN32 下的 Turbo Fractal 方法软件, 用于计算时间序列的多维分形特征. 针对二维场的多维分形特征, 开发了 GeoDAS 数据处理和分析程序. 本文所用图形全部为这两个应用程序的直接输出结果, 它们都是面向对象(Object) 的设计, 可以利用鼠标方便地选中、删除或增加分割段数(图 2、图 3) .

5　讨　论

时间序列、二维地球物理场都可能是多个分形信号缠绕在一起的结果, 理解这些分量, 并分解出这些分量, 对整体物理过程的理解至为关键. 本文仅仅给出了地球物理测井、重磁场的多维分形实例, 也可以使用天然地震信号, 地震反射信号等作更多的试算.

参　考　文　献

[1] 李庆谋, 成秋明. 测井曲线分形校正[J]. 地球科学, 2001(待发表) .

[2] 李庆谋, 刘少华. 分形噪声(多维) 、分形滤波及地球物理测井曲线的处理与应用[J]. 物探化探计算技术, 2001, (待发表) .

[3] Qiuming Cheng, Qingmou Li, Yaguang Xu. Self-similarity/Self-affinity Recognition and Geochemical Anomaly Separation. GeoCanada 2000, Web http://www.gisworld.org/conferrence.htm, 2000.

[4] Qiuming Cheng, Qingmou Li. New Krigging Incorporating both Spatial Association and Singularity in data Interpolation[A]. APCOM 2001, Beijing(in print) .

[5] Qiuming Cheng, Qingmou Li. A Fractal Concentration Method[J]. Computer Geosciences, 2001, (Accepted) .

[6] Qiuming Cheng, Qingmou Li. Workshop Book of GeoDAS Phrase I[M]. York University, PAGE 204, Nov. 1~ 3, 2000.

[7] C Von Sarigny, O Funk, V Platt, K Pfeisticker. Radiative Smoothing in Zenith-Scattered Skylight Transmitted Through Optically Thick Clouds to the Ground[J]. Geophys. Res. Letters, 1999, 26(19) : 2949~ 2952.

[8] Renats Dmowska, Burry Saltzman. Advances in Geophysical Long-Range Persistence in Geophysical Time Series[M]. San Diego: Academic Press, 1999.

[9] P R Vail. 徐怀大译, 层序地层学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.

[10] 申维. 分形模型与大型、超大型矿床[A]. 见: 中国数学地质(9) [C], 中国地质学会数学地质专业委员会主编, 北京: 地质出版社, 1998.

[11] John W Harbangh, Graeme Bonham-Carter. Computer Simulation in Geology[M], Florida: Robert E. Krioger Publishing Company, 1981.

[12] Qingmou Li, Qiuming Cheng. Well logging Reconstruction by Fractal Method[J]. Computer & Geosciences, 2001(Accepted).

[13] G Eigele, W Richen. A Seilacher (Eds.) Cycles and Events in Stratigraphy, Springer-verlay[M]. Berlin, Heidelberg, 1991.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

[14] Doveton J H. Log Analysis in Subsurface Geology[M], 2nd Edition, New York, NY, John Wiley and Sons, 1981, 273.
[15] Qingmou Li. Milankovitch Cycles Analysis and Application by Logging Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 36(5): 699~ 704.
[16] David J, Krug Linski, Scott Wingo. Inside Visual C+ + 6.0[M], Microsoft Press, 1999.

MULTI FRACTAL AND APPLICATION OF GEOPHYSICAL DATA

LI Qing-mou[1,2] LIU Shao-hua[2]
(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100101 *China*;
2. *Dept. of Earth & Atmospheric, York University, Toronto, Canada*)

Abstract: Geophysical data is the response of geology and geophysical process, which is characterized as self-affinity or scale invariant. Stacked fractal geophysical data are represented as multifractal geophysical data. It can be used in geophysical data correction, singularity study and filtering different dynamic geophysical processes by studying the energy and energy density of 1D series and 2D spatial fields. The spectra energy density with fractal properties was used in this research and well logging and bouger anomaly and magnetic fields are used as examples.

Keywords: Multifractal; Energy density; Well Log Series; Gravitical and magnetic fields

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww